文章编号:1000-4939(2023)05-1058-10

CFRP 复合材料构件胶接特性及失效规律研究

邵家儒,刘牛,杨瑜,郑子君

(重庆理工大学机械工程学院,400054 重庆)

摘 要:对不同铺层方式和不同胶层厚度的复合材料胶接单搭结构(SLJs)的连接性能进行了研究。使用内聚力模型模拟了 SLJs 的胶层退化及失效过程,通过与实验对比验证了数值模型的有效性;基于改进后的三维 Hashin 失效准则,模拟了复合材料层合板的损伤演化。结果表明:胶层的退化形态及失效规律与胶层粘连的复合材料铺层角度密切相关,当胶层两侧粘连的复合材料铺层角度为 0°时,胶层会退化形成椭圆环状;当胶层两侧粘连的复合材料铺层角度为 45°或 −45°时,胶层会退化形成上下中心对称的水滴状;当胶层两侧粘连的复合材料铺层角度为 90°时,胶层会退化成沙漏状。0°铺层与胶层相邻时,结构的极限失效载荷最大,此时复合材料未出现损伤;当 90°铺层与胶层相邻,结构的极限失效载荷最小且复合材料出现基体损伤、纤维损伤和分层损伤。胶层厚度在 0.05 ~ 0.5mm 时,复合材料胶接单搭结构的连接性能最好,当胶层厚度大于 0.5mm,结构的连接性能会大幅下降。

关键词:复合材料;胶接结构;损伤演化;连接强度

中图分类号:TB332 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.011

Research on the bonding characteristics and failure rules of CFRP composite

SHAO Jiaru, LIU Niu, YANG Yu, ZHENG Zijun

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, 400054 Chongqing, China)

Abstract: The connection performance of the adhesively bonded single-lap joints(SLJs) of composite with different stacking sequences and different adhesive layer thicknesses was studied. The cohesive zone model (CZM) was used to simulate the damage initiation and failure process of the adhesive layer between the adherends. The effectiveness of the finite element method(FEM) was verified by comparison with the experiment. Based on the improved 3D Hashin failure criterion, the damage evolution of the composite materials was researched. The results show that the damage modes and failure laws of the adhesive layer are related to the angle of the composite material layup. When the angle of the composite material adhesion on both sides of the adhesive layer is 0°, the adhesive layer will degenerate and form an elliptical ring. When

收稿日期:2022-12-29 **修回日期**:2023-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11702046);重庆市技术创新与应用发展重大主题专项(No. cstc2019jscx-zdztzx0028;cstc2019jscx-zdztzx0020)

通信作者:邵家儒,副教授。E-mail:shaojiaru@cqut.edu.cn

引用格式:邵家儒,刘牛,杨瑜,等. CFRP 复合材料构件胶接特性及失效规律研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1058-1067.
SHAO Jiaru, LIU Niu, YANG Yu, et al. Research on the bonding characteristics and failure rules of CFRP composite[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1058-1067.

the angle is 45° or −45°, the adhesive layer will degenerate and form two droplets symmetrical in the upper and lower centers. When the angle is 90°, the adhesive layer will degenerate and form an hourglass shape. When the 0° layup is adjacent to the adhesive layer, the structure has the largest ultimate failure load and no damage appears in the composite materials. When the 90° layup is adjacent to the adhesive layer, the structure has the lowest ultimate failure load, and the composite material will have matrix damage, fiber damage and delamination. With the thickness of the adhesive layer between 0.05 mm and 0.5 mm, the adhesively bonded single-lap joints have better connection performance. If the thickness of the adhesive layer is greater than 0.5mm, the connection performance of the SLJs will be greatly reduced.

Key words: composite; adhesively bonded structure; damage evolution; bonding strength

复合材料因其优异的强度、重量比等特点被广泛应用于飞机、汽车等装备设计中。复合材料常用的连接方式中,螺栓连接结构稳定,但开孔会引起应力集中现象,进而影响结构的力学性能。复合材料构件的胶接连接可以抑制裂纹扩展,对结构增重较少,但可能出现不同程度的材料退化和胶层损伤,影响对结构承载能力的评估。因此,确定复合材料结构的胶接特性[1-2],探明胶层上的材料失效形式及失效规律,对于现代装备设计具有重要意义。

为了预测复合材料胶接结构的损伤起始[3]和演化,近年来众多学者进行了大量的实验研究和数值仿真分析[4-5]。对于胶接结构的失效问题,许多研究采用了复合材料失效准则和内聚力失效模型[6]进行分析,比较了不同尺寸参数的胶接结构连接性能[7-9]和层合板的损伤情况[10]。文献[11-13]表明连接件的胶接区域表面处理质量、搭接长度、胶层厚度和温度等都会影响胶接结构的连接性能。文献[14]研究了4种不同铺层方式的复合材料胶接单搭连接结构的准静态拉伸强度,结果表明就接头拉伸强度而言,准各向同性铺层不是最佳选择。文献[15]研究了纽扣状接头的胶接连接方式的连接性能,结果表明在最佳尺寸参数下,纽扣状胶接接头的最大剥离应力和剪切应力分别降低了约160%和70%。文献[16]通过有限元分析和实验研究了不同搭接方式下复合材料胶接结构的连接性能,有限元分析得到的应力-应变关系和应变分布结果与实验吻合良好。

在国内,文献[17]基于 Tsai-Wu 强度准则,提出了一种新型刚度退化模型,建立了一套复合材料结构渐进损伤分析的通用方法,编写 ABAQUS 用户材料子程序用于层合型和实体型复合材料典型结构的渐进损伤数值仿真与试验验证。文献[18]通过实验测试不同循环次数后胶接接头的剩余强度,结果表明随着交变载荷循环周期增加,接头的剩余强度呈先慢后快的下降趋势。文献[19]通过仿真与实验提出相控阵超声检测激活孔径优化方法对复合材料层压板分层缺陷进行检测。已有的研究大多基于给定的复合材料胶接结构的连接性能进行研究,而对复合材料层合板胶接结构的胶层本身的退化趋势研究较少。

本研究验证了胶接数值模型的准确性和有效性,分析了胶层两侧粘连的复合材料铺层角度对胶层退化方向的影响,对比了不同胶层厚度下复合材料胶接单搭结构的连接性能,揭示了不同工况下复合材料胶结结构力学特性及失效规律。本研究结果对复合材料结构连接设计及结构修补具有一定指导意义。

1　计算方法

1.1　复合材料层合板渐进损伤模型

本研究采用改进后的三维 Hashin 失效准则[20]并编写了相应的 Abaqus 子程序来判断复合材料层合板是否出现损伤以及损伤的形式。改进的三维 Hashin 失效准则表达式如下。

纤维拉伸(FT)失效($\sigma_{11} \geqslant 0$)

$$FT = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{1}$$

纤维压缩(FC)失效($\sigma_{11} < 0$)

$$FC = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 \geqslant 1 \tag{2}$$

基体拉伸(MT)失效($\sigma_{22} \geqslant 0$)

$$MT = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{3}$$

基体压缩(MC)失效($\sigma_{22} < 0$)

$$MC = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{4}$$

基体纤维剪切失效（$\sigma_{11} < 0$）

$$\mathrm{MS} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{5}$$

拉伸分层(DLT)失效（$\sigma_{33} < 0$）

$$\mathrm{DLT} = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{6}$$

拉伸压缩(DLC)失效（$\sigma_{33} < 0$）

$$\mathrm{DLC} = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{7}$$

式中：$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ 为正应力；$\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ 为剪切应力；X_T, X_C 为单层板纵向拉伸强度和压缩强度；Y_T，Y_C 为单层板横向拉伸强度和压缩强度；Z_T, Z_C 为垂直于单层板方向的拉伸强度和压缩强度；S_{12}, S_{13}，S_{23} 分别为纵向和两个横向的剪切强度。

当上述某个失效判据值为1时，需要对材料刚度进行折减。本研究复合材料层合板刚度退化准则选用改进的Tan退化准则[21]，参数如表1所示。

表1 复合材料层合板刚度退化准则

Tab. 1 Stiffness degradation rules of the composite laminates

失效形式	刚度退化准则
纤维拉伸失效	$E_{11}' = 0.14E_{11}$
纤维压缩失效	$E_{11}' = 0.14E_{11}$
基体拉伸失效	$E_{22}' = 0.2E_{22}, G_{22}' = 0.2G_{22}, G_{23}' = 0.2G_{23}$
基体压缩失效	$E_{22}' = 0.4E_{22}, G_{12}' = 0.4G_{12}, G_{23}' = 0.4G_{23}$
剪切失效	$G_{12}' = 0, v_{12}' = 0$
拉伸分层失效	$v_{13}' = 0.2v_{13}, v_{23}' = 0.2v_{23}, E_{33}' = 0.2E_{33}$ $G_{13}' = 0.2G_{13}, G_{23}' = 0.2G_{23}$
压缩分层失效	$v_{13}' = 0.2v_{13}, v_{23}' = 0.2v_{23}, E_{33}' = 0.2E_{33}$ $G_{13}' = 0.2G_{13}, G_{23}' = 0.2G_{23}$

1.2 胶层渐进损伤模型

本研究使用Cohesive单元模拟胶层单元，其双线性本构模型如图1所示。当Cohesive单元未失效时，其本构关系为线性关系，刚度分别是 K_{nn}, K_{ss}，K_{tt}。本研究使用Quads(二次名义应力准则)准则来判断Cohesive单元是否出现损伤，如式(8)所示。

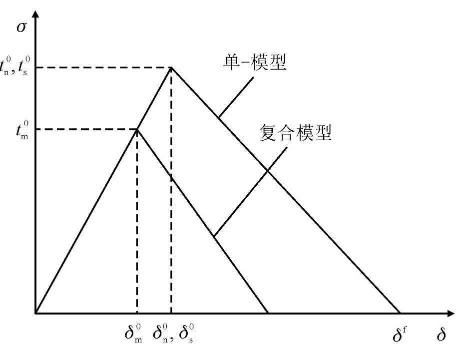
$$\left\{\frac{\langle t_n\rangle}{t_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_s}{t_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_t}{t_t^0}\right\}^2 = 1 \tag{8}$$

式中：t_n^0 为层间和胶层单元的法向强度；t_s^0 和 t_t^0 为剪切强度。当满足式(8)时，Cohesive单元进入损伤阶段。记损伤系数为 D，则Cohesive单元损伤本构关系为

$$t = (1 - D)\begin{bmatrix} K_{nn} & & \\ & K_{ss} & \\ & & K_{tt} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：损伤系数 D 可表示为式(10)，当 $D=0$ 时，Cohesive单元尚未出现损伤；当 $D=1$ 时，Cohesive单元完全失效。

$$D = \begin{cases} 0 & \text{Undamaged} \\ 1 & \text{Completely damaged} \end{cases} \tag{10}$$



注：下标n表示拉伸；s表示剪切；m表示混合。

图1 Coheisve单元双线性本构模型

Fig. 1 Bilinear constitutive model of cohesive element

使用基于能量的幂指数准则模拟内聚力单元失效过程

$$\left[\frac{G_n}{G_n^C}\right]^\alpha + \left[\frac{G_s}{G_s^C}\right]^\alpha + \left[\frac{G_t}{G_t^C}\right]^\alpha = 1 \tag{11}$$

式中：G_n^C 为法向临界断裂能；G_s^C, G_t^C 分别为切向一临界断裂能和切向二临界断裂能；α 为材料参数，本研究取1.25。Cohesive单元的失效参数SDEG可表示为

$$\mathrm{SDEG} = \frac{\delta_m^f(\delta_m^{max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{max}(\delta_m^f - \delta_m^0)} \tag{12}$$

式中：δ_m^0 为界面单元刚度降阶的位移临界值；δ_m^f 为界面单元失效的位移临界值；δ_m^{max} 为加载过程中最大的有效位移。

2 模型验证

为了验证模型的有效性，本研究首先与文献[1]中的复合材料胶接单搭连接件的拉伸实验结果进行对比。复合材料单搭胶接结构模型尺寸如图2所示，复合材料层合板长120 mm，搭接宽度为25 mm，厚度3.6 mm，复合材料层合板材料参数如表2所示；胶层厚度为0.12 mm，胶层材料参数如表3所示。复合材料铺层方式为$[45°/0°/-45°/90°]_{4s}$。胶层单元采用COH3D8单元，复合材料层合板采用

C3D8R 单元，模型左端固定，右端施加沿轴向方向的位移载荷。对搭接处进行网格加密处理，搭接处的网格尺寸为 0.5 mm×0.5 mm，如图 3 所示。

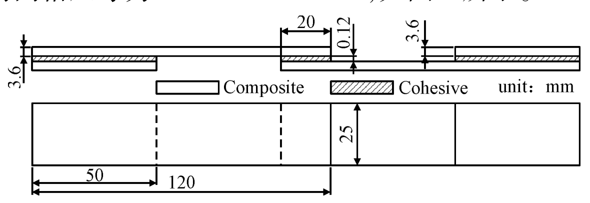


图 2　复合材料层合板单搭胶接结构[1]

Fig. 2　Adhesively bonded single-lap joints of composite laminates[1]

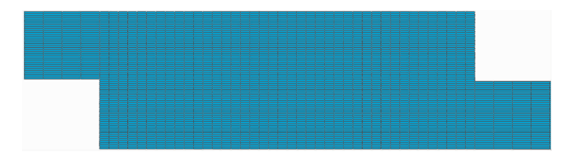


图 3　搭接处网格加密

Fig. 3　The mesh density at overlap joint

当搭接长度为 20 mm 时，复合材料胶接结构的位移-失效载荷曲线变化趋势与实验所得到的曲线变化趋势拟合较好，如图 4 和图 5 所示。搭接长度为 5、10、15 和 20 mm 时，复合材料胶接单搭结构有限元计算的失效载荷分别为 4.785 6、7.841 9、9.380 6 和 9.789 8 kN，文献[1]中实验结果的失效载荷分别为 4.504 7、7.536 4、8.831 4 和 9.411 0 kN，有限元模拟结果与实验的误差分别为 6.2%、4.06%、6.22% 和 4.03%。本研究的模型能够很好地分析复合材料结构胶接问题。

表 2　复合材料层合板的材料参数

Tab. 2　Mechanical properties of composite laminates

材料属性	数值
1 方向弹性模量 E_{11} /MPa	125 000
2,3 方向弹性模量 E_{22}, E_{33} /MPa	11 300
23 面内剪切模量 G_{23} /MPa	3 980
12 面内,13 面内剪切模量 G_{12}, G_{13} /MPa	5 430
1-2,1-3 泊松比 v_{12}, v_{13}	0.30
2-3 泊松比 v_{23}	0.42
纵向拉伸强度 X_T /MPa	2 000
纵向压缩强度 X_C /MPa	1 100
横向拉伸强度 Y_T /MPa	80
横向压缩强度 Y_C /MPa	280
法向拉伸强度 Z_T /MPa	80
法向压缩强度 Z_C /MPa	280
剪切强度 S /MPa	120

表 3　胶层材料参数

Tab. 3　Mechanical properties of adhesive

材料参数	数值
弹性模量 E_n /MPa	3 400
剪切模量 E_s, E_t/MPa	3 400
拉伸强度 t_n^0 /MPa	31.5
剪切强度 t_s^0, t_t^0 /MPa	36.5
拉伸断裂能 G_n^C /(N·mm^{-1})	0.9
剪切断裂能 G_s^C, G_t^C /(N·mm^{-1})	1.0

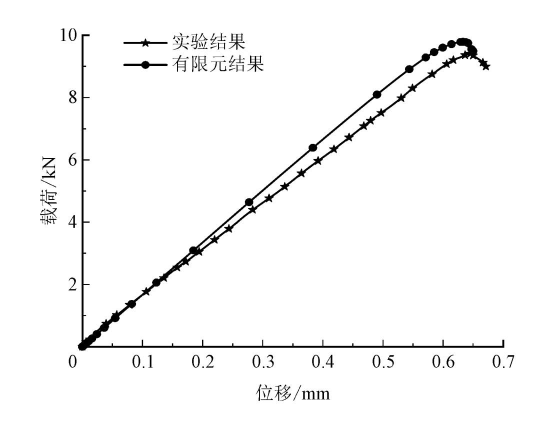


图 4　搭接长度为 20 mm 的胶接结构的位移-载荷曲线

Fig. 4　Displacement-load curve of SLJs with a overlap length of 20 mm

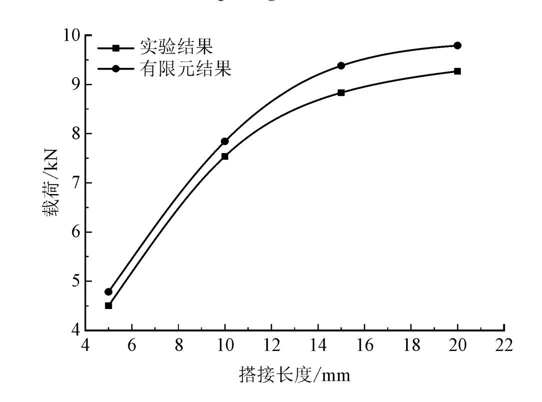


图 5　不同搭接长度胶接结构有限元分析结果与实验对比

Fig. 5　Comparison of FEM and experimental results of SLJs with different overlap lengths

3　算例分析

为了研究胶层两侧粘连的复合材料铺层角度对胶层退化方向的影响，本研究以工程实际中常用的 0°、45°、−45°和 90°铺层为基础，对 4 种不同铺层顺序的复合材料胶接单搭分析模型进行了数值模拟分

析,复合材料层合板铺层方式如表 4 所示。为了研究不同胶层厚度下的复合材料胶接单搭结构连接性能的差异,本研究建立了胶层厚度为 0.05、0.1、0.3、0.5 和 1 mm 的复合材料胶接单搭模型。

表 4 复合材料层合板铺层方式

Tab. 4 The stacking sequence of composite laminates

序号	铺层顺序
1	$[90°/-45°/45°/0°]_s$
2	$[0°/45°/-45°/90°]_s$
3	$[45°/90°/0/°-45°]_s$
4	$[-45°/90°/0°/45°]_s$

3.1 复合材料胶接单搭有限元模型

复合材料胶接单搭模型的几何尺寸如图 6 所示,复合材料层合板长度为 100 mm,搭接宽度为 25 mm,厚度为 2 mm,胶层厚度为 0.1 mm,搭接方式为单搭接。表 3、表 5 分别给出了胶层和复合材料层合板的材料参数。

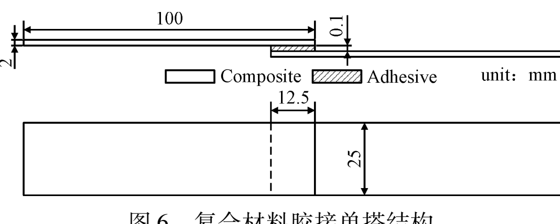


图 6 复合材料胶接单搭结构

Fig. 6 Adhesively bonded single-lap joints of composite laminates

3.2 铺层顺序对胶层退化趋势的影响

为了研究铺层顺序对胶层退化趋势的影响,分别对 4 组铺层方式的复合材料层合板胶接单搭结构进行了数值模拟分析,铺层方式如表 4 所示,使得胶层两侧分别同时粘连 0°、45°、-45°和 90°铺层。

胶层两侧连接层为 0°铺层时,胶层单元退化发展图如图 7 所示。胶层两侧首先出现部分胶层单元失效,随着载荷的增大,胶层向中轴线退化。继续施加位移载荷,胶层中心大量胶层单元同时失效,形成一个椭圆形失效区。随着载荷的增加,胶层由椭圆外侧向中心持续退化直到胶层单元全部失效。

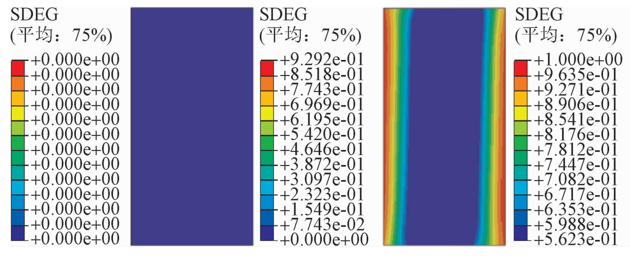
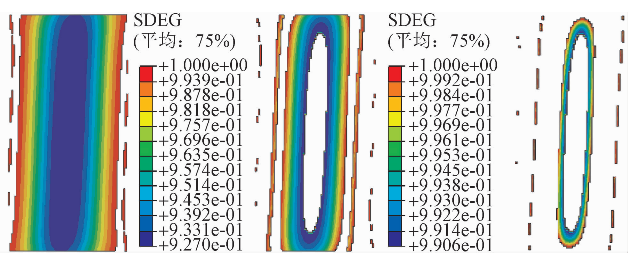



图 7 与 0°铺层相连时胶层退化趋势图

Fig. 7 Degradation trend of adhesive layer when connected with 0° layer

当胶层两侧连接 90°铺层时,胶层损伤首先从左下角和右上角开始,随后退化沿胶层对角线向中心扩展,逐渐形成沙漏状的胶层,最后,胶层从沙漏的中部向两端退化直至完全失效,其胶层单元退化发展情况如图 8 所示。

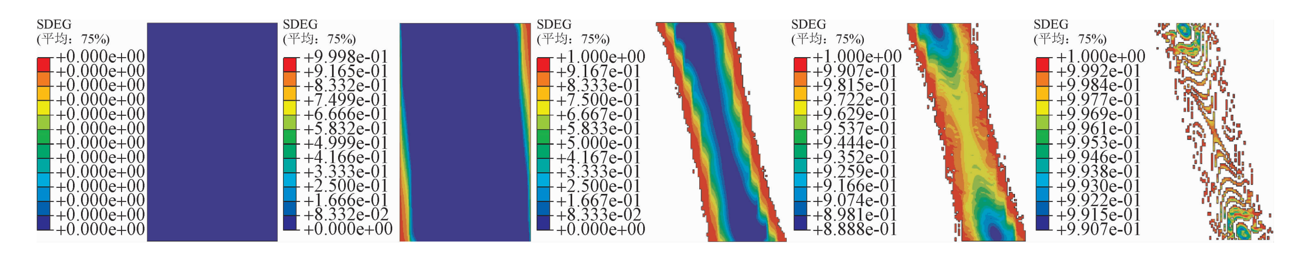


图 8 与 90°铺层相连时胶层退化趋势图

Fig. 8 Degradation trend of adhesive layer when connected with 90° layer

对于胶层两侧连接层为 45°铺层的情况,通过图 9 给出的胶层单元退化情况可以发现,左上角和右上角的胶层单元首先出现损伤,并在相同的位置部分胶层单元最先失效,随后以一定的角度向胶层中心扩散。最后胶层中心的胶层单元开始退化,逐渐形成上下两个中心对称的水滴状胶接区并缓慢减小,直至完全消失。

胶层两侧连接的是 -45°铺层时,胶层单元退化

发展情况如图 10 所示。左下角和右上角的胶层单元先出现损伤并退化,随后以一定的角度向胶层中心扩散,逐渐形成上下两个中心对称的水滴状胶层。图 9 与图 10 的胶层退化趋势相似但未呈镜像,说明胶层退化方向不完全由胶层两侧所粘接的复合材料铺层角度决定,也受复合材料层合板整体铺层方式的影响。

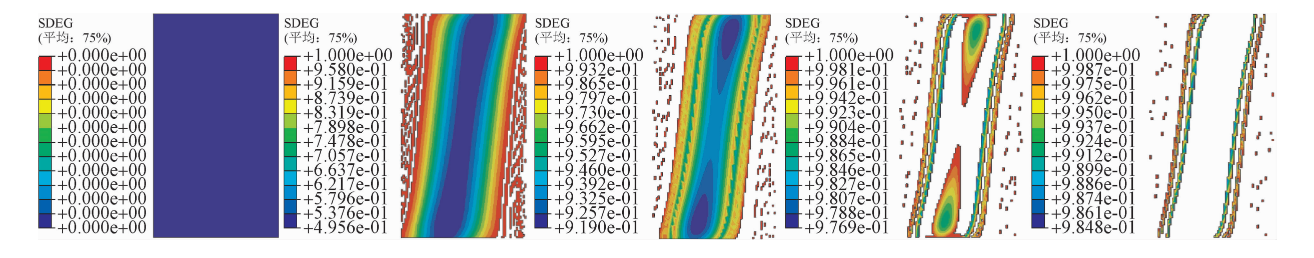


图 9　与 45°铺层相连时胶层退化趋势图

Fig. 9　Degradation trend of adhesive layer when connected with 45° layer

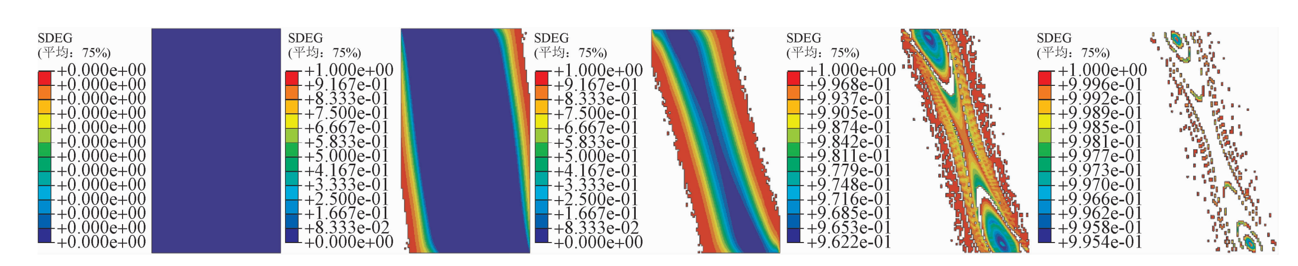


图 10　与 -45°铺层相连时胶层退化趋势图

Fig. 10　Degradation trend of adhesive layer when connected with -45° layer

当胶层两侧粘连复合材料铺层角度均为 0°、90°、45°或 -45°时,胶层单元的初始失效形式如图 11 所示。这里引入参数 MMIXDMI,该参数为法向张开断裂能与法向和两个剪切方向临界断裂能之和的比值。数值在 0 ~ 0.5 蓝色区域的胶层单元的失效形式以拉伸破坏为主,数值在 0.5 ~ 1 的红色区域的胶层单元的失效形式以剪切破坏为主。可以看出:当与胶层两侧粘连的复合材料的铺层角度为 0°时,99% 的胶层单元的失效形式为剪切破坏;而当胶层两侧粘连的复合材料铺层角度是 90°时,剪切破坏的胶层单元数量与拉伸破坏的胶层单元数量大致相同。当胶层两侧粘连的复合材料铺层角度为 45°和 -45°时,约 10% 的胶层单元的破坏形式为拉伸破坏,约 90% 的胶层单元破坏形式为剪切破坏。对于拉伸问题,越多的剪切失效,意味着结构可承受的拉伸载荷越大。有限元分析结果表明,当胶层两侧粘连的复合材料角度为 0°时,结构整体抗拉伸强度会得到提升。图 11 中,(a)0°和(c)45°表现相似,(b)90°和(d) -45°表现相似,(a)(c)和(b)(d)为较大差异,这一现象说明在拉伸载荷作用下,胶层的初始损伤形式同时受胶层相邻的复合材料铺层角度和复合材料层合板整体铺层方式的影响。

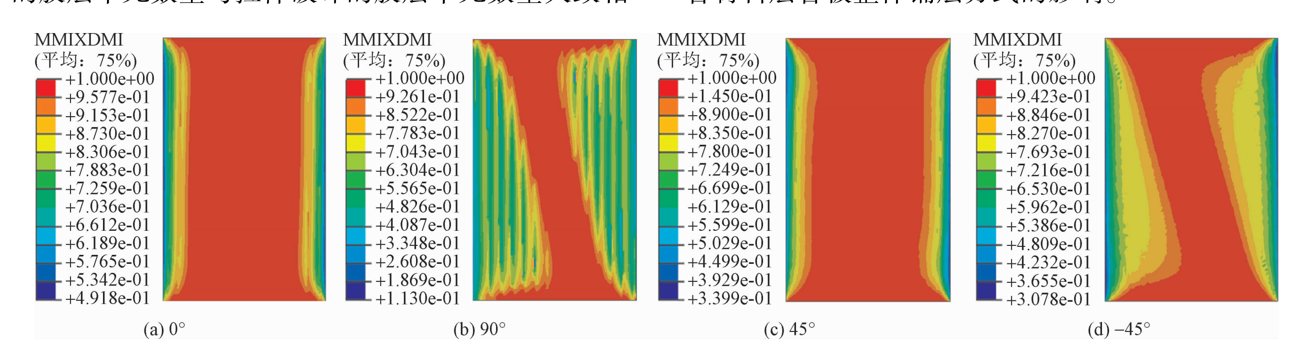


图 11　胶层相邻的复合材料的铺层角度对胶层单元失效方式的影响

Fig. 11　The effect of the ply angle of the composite material adjacent to the adhesive layer on the failure mode

图 12 为复合材料层合板在 4 种不同铺层方式下的基体拉伸损伤分布情况。由于铺层方式 2 使得

0°铺层粘连在胶层两侧,复合材料层合板基体未出现损伤;由于90°铺层复合材料的铺层方向与拉伸载荷方向正交,铺层方式 1 的复合材料层合板出现了大面积的带状基体拉伸损伤区域。铺层方式 3 和铺层方式 4 分别使胶层两侧同时粘连 45°铺层和 -45°铺层,对应的复合材料层合板出现了不同程度的基体拉伸损伤,并以一定的角度扩展。

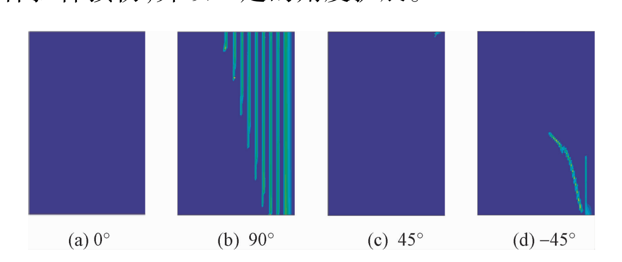


图 12　胶层两侧连接不同铺层角度的复合材料的基体拉伸损伤情况

Fig. 12　Matrix damage of composite materials with different ply angles bonded on both sides

4 种铺层顺序下复合材料层合板的纤维拉伸损伤情况如图 13 所示。铺层方式 2 和铺层方式 3 的复合材料层合板均未出现纤维拉伸损伤;而铺层方式 1 和铺层方式 4 对应的复合材料层合板使得 90°铺层和 -45°铺层粘接在胶层两侧,出现了纤维拉伸损伤,且损伤区域与基体拉伸损伤区域大致重合。

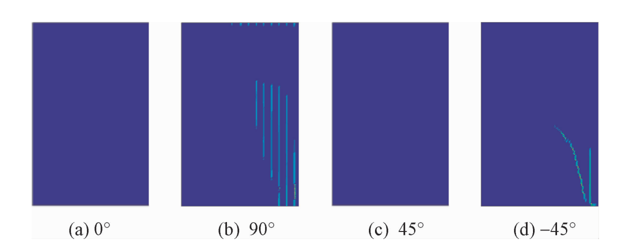


图 13　胶层两侧连接不同铺层角度的复合材料的纤维拉伸失效情况

Fig. 13　Fiber damage of composite materials with different ply angles bonded on both sides

这表明当基体承载能力下降后,已损伤基体区域附近的纤维承受的载荷变大,因而较其他基体未受损区域的纤维而言,已损伤的基体区域附近的纤维就更容易受损。

4 种铺层方式下复合材料层合板拉伸分层损伤分布情况如图 14 所示。铺层方式 2 和铺层方式 3 对应的复合材料层合板使得 0°铺层和 45°铺层粘接在胶层两侧,均未出现基体损伤和纤维损伤,复合材料层合板仍保持着较好的强度;铺层方式 1 和铺层方式 4 对应的复合材料层合板使得 90°铺层和 -45°铺层粘接在胶层两侧,在基体损伤和纤维损伤区域出现了拉伸分层失效。当该区域的基体和纤维均处于损伤状态时,其复合材料整体承载能力下降明显,容易出现分层损伤。

表 5　复合材料单搭接时层合板的材料参数

Tab. 5　Mechanical properties of composite laminates

材料属性	数值
1 方向弹性模量 E_{11} /MPa	140 000
2,3 方向弹性模量 E_{22},E_{33} /MPa	8 800
23 面内剪切模量 G_{23} /MPa	4 600
12 面内,13 面内剪切模量 G_{12},G_{13} /MPa	3 300
1-2,1-3 泊松比 v_{12},v_{13}	0.27
2-3 泊松比 v_{23}	0.36
纵向拉伸强度 X_T /MPa	2 186
纵向压缩强度 X_C /MPa	1 240
横向拉伸强度 Y_T /MPa	80
横向压缩强度 Y_C /MPa	280
法向拉伸强度 Z_T /MPa	55.5
法向压缩强度 Z_C /MPa	175
剪切强度 S /MPa	120

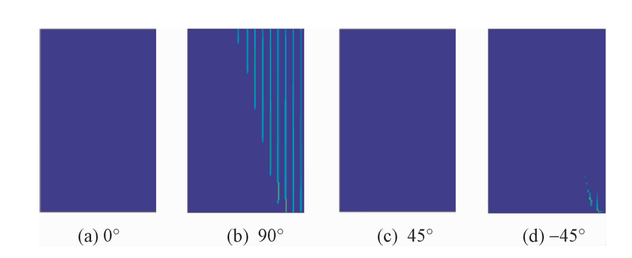


图 14　胶层两侧连接不同铺层角度的复合材料的拉伸分层失效情况

Fig. 14　Delamination of composite materials with different ply angles bonded on both sides

图 15 为 4 种铺层方式下,复合材料胶接单搭结构的位移-载荷曲线。当胶层两侧同时粘接 0°、45°、-45°和 90°铺层的复合材料层合板时,胶接单搭结构所能承受的最大载荷分别为 5.9、3.95、3.21 和 4.68 kN。当胶层两侧粘接 0°铺层的复合材料层合板时,复合材料胶接单搭结构连接强度较 45°、-45°和 90°铺层分别提升 49.37%、83.80% 和 26.07%。可见,当胶层邻近的复合材料层合板铺层角度为 0°时,其方向与拉伸载荷的方向一致,复合材料胶接单搭构件能够承受更大的拉伸载荷。

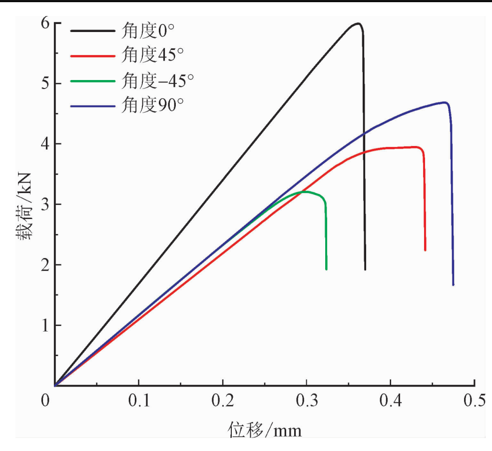


图 15　黏接不同铺层角度复合材料层合板胶接结构的位移-载荷曲线

Fig. 15　Displacement-Load curve of SLJs with different ply angles bonded

3.3　胶层厚度对复合材料胶接连接性能的影响

由上述数值模拟结果可知，对于复合材料胶接单搭结构而言，胶层两侧连接的均为 0°铺层时，复合材料胶接单搭连接结构可以获得较好的连接性能，因此采用的复合材料层合板铺层方式为 $[0°/45°/-45°/90°]_{2s}$。根据图 5 所示的复合材料层合板的尺寸，建立了胶层厚度分别为 0.05、0.1、0.3、0.5、1 mm 的复合材料层合板胶接单搭连接结构的有限元分析模型。

由图 16 和图 17 可知，胶层厚度为 0.05、0.1、0.3、0.5、1 mm 时，胶层可承受的最大应力分别为 43.44、42.34、39.89、40.17、31.90 MPa。胶层可承受的最大应力随着胶层厚度的增加总体上呈下降趋势，但是当胶层厚度处于 0.3 ~ 0.5 mm 时，胶层可承受的最大应力并没有下降，反而小幅增加。当胶层厚度在0.05 ~ 0.5 mm 时，胶层可承受的最大应力下降缓慢，最大降幅为 7.73%。当胶层厚度为 1 mm 时，其可承受的最大应力相较于厚度为 0.5 mm 的胶层下降了 20.73%，较厚度为 0.05 mm 时的胶层下降了 26.57%，下降幅度较大。

通过分析图 18 的位移载荷曲线可以发现，胶层厚度为 0.05、0.1、0.3、0.5、1 mm 时，其失效位移分别为 0.37、0.36、0.34、0.33、0.3 mm，胶接结构可承受的最大载荷为 6.40、5.99、5.57、5.20、4.43 kN。胶接结构的失效位移和胶接结构整体可承受的最大载荷与胶层厚度成反比。相较于厚度为 0.05 mm 的复合材料层合板胶接单搭结构，其余厚度的胶层胶接单搭结构失效载荷降幅分别为 6.40%、12.97%、18.75%、30.78%。随着胶层厚度的增加，剥离应力逐渐增大，导致复合材料胶接单搭结构整体连接性能下降。

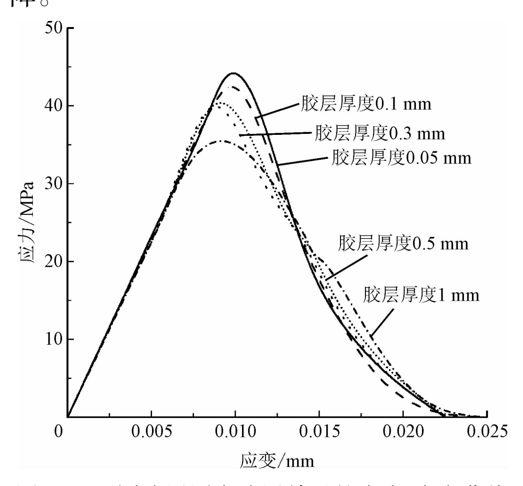


图 16　不同胶层厚度胶层单元的应力-应变曲线

Fig. 16　Stress-strain curves of adhesive layers with different adhesive thickness

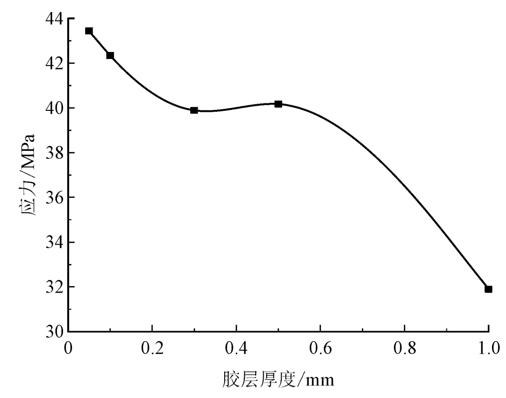


图 17 不同厚度的胶层可承受的最大应力变化曲线

Fig. 17　The maximum stress variation curve of different thickness of the adhesive layer

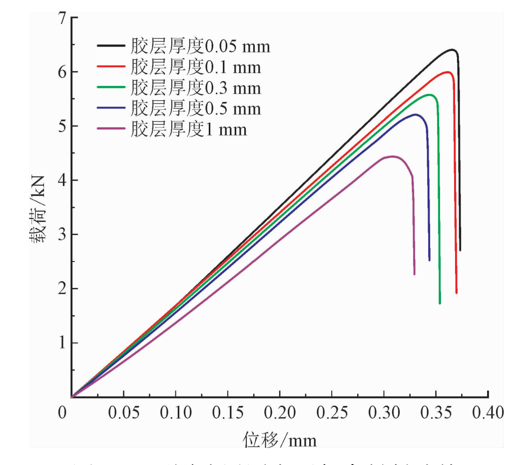


图 18　不同胶层厚度下复合材料胶接单搭接头位移-载荷曲线

Fig. 18　Displacement-load curve of SLJs with different adhesive thicknesses

4 结　论

本研究首先验证了胶接数值模型的准确性和有效性,通过分析胶层两侧粘连的复合材料铺层角度对胶层退化方向的影响,对比不同胶层厚度下复合材料胶接单搭结构的连接性能,得到如下结论。

1)与胶层相邻的复合材料铺层角度会对胶层退化方向和趋势产生不同的影响。当胶层两侧粘连的复合材料铺层角度为0°时,胶层会退化形成椭圆环状;当胶层两侧粘连的复合材料铺层角度为45°或-45°时,胶层会退化形成上下中心对称的水滴状;当胶层两侧粘连的复合材料铺层角度为90°时,胶层会退化成沙漏状。根据退化规律可以判断胶层大致的损坏区域,从而及时修补胶层,保证复合材料胶接单搭结构的连接强度。

2)与胶层相邻的复合材料层合板的铺层角度对复合材料胶接单搭结构的连接性能有影响。当胶层两侧相邻的复合材料铺层角度为0°时,胶层失效形式为剪切失效,结构的连接性能最好;当胶层两侧相邻的复合材料铺层角度为45°或-45°时,结构的连接性能较差。当胶层两侧相邻的复合材料铺层角度为90°时,结构极限失效载荷较大,但拉伸失效的胶层单元占比达50%,不利于结构的安全和稳定。

3)铺层方式对复合材料层合板造成的损伤形式不同。当胶层两侧相邻的复合材料铺层角度均为0°时,复合材料层合板不会出现任何形式的损伤;当胶层两侧相邻的复合材料铺层角度均为45°,复合材料层合板会出现基体损伤;当胶层两侧相邻的复合材料铺层角度均为90°或-45°时,与胶层相连的90°铺层和-45°铺层的复合材料搭接区内会出现基体损伤、纤维损伤和分层损伤。

4)胶层厚度对复合材料层合板胶接单搭结构的连接性能有影响。胶层厚度越大,胶层可承受的最大应力下降,当胶层厚度大于0.5 mm时,可承受的最大应力下降加剧。随着胶层厚度的增加,复合材料层合板胶接单搭结构的承载能力也逐渐下降。对于复合材料层合板胶接单搭结构,当胶层厚度为0.05~0.5 mm时,复合材料胶接单搭结构整体可以获得较好的连接强度,而当胶层厚度超过0.5 mm时,复合材料胶接单搭结构的连接性能会大幅下降。

参考文献:

[1] 毛振刚,侯玉亮,李成,等.搭接长度和铺层方式对CFRP复合材料层合板胶接结构连接性能和损伤行为的影响[J].复合材料学报,2020,37(1):121-131.
MAO Zhengang, HOU Yuliang, LI Cheng, et al. Effect of lap length and stacking sequence on strength and damage behaviors of adhesively bonded CFRP composite laminates[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2020, 37(1):121-131(in Chinese).

[2] 周晔欣,戴如玥,黄争鸣.复合材料结构力学分析CAE软件现状[J].应用力学学报,2020,37(1):114-122.
ZHOU Yexin, DAI Ruyue, HUANG Zhengming. Current status of CAE software for composite structural analysis[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(1):114-122(in Chinese).

[3] 赵玺,路国运,彭晓兵,等.基于损伤力学的复杂航空构件疲劳寿命预估[J].应用力学学报,2020,37(3):1007-1012.
ZHAO Xi, LU Guoyun, PENG Xiaobing, et al. Fatigue life prediction of complex aeronautical components based on damage mechanics[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(3):1007-1012(in Chinese).

[4] ESLAMI G, YANES-ARMAS S, KELLER T. Energy dissipation in adhesive and bolted pultruded GFRP double-lap joints under cyclic loading[J]. Composite structures, 2020, 248:112496.

[5] CHENG X Q, ZHANG Q, ZHANG J, et al. Parameters prediction of cohesive zone model for simulating composite/adhesive delamination in hygrothermal environments[J]. Composites part B: Engineering, 2019, 166:710-721.

[6] 李传习,罗南海,柯璐,等.胶膜连接碳纤维增强树脂复合材料板-钢搭接接头室温条件的力学性能试验[J].复合材料学报,2020,37(2):318-327.
LI Chuanxi, LUO Nanhai, KE Lu, et al. Experimental study on carbon fiber reinforced polymer laminate-steel lap joints connected with film adhesive at room temperature[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2020, 37(2):318-327(in Chinese).

[7] 罗书舟.冲击载荷下碳纤维复合材料胶接接头力学性能研究[D].长沙:湖南大学,2018.

[8] 郭凯特,谢宗蕻,李想,等.复合材料双面贴补修理拉伸解析分析模型及试验验证[J].复合材料学报,2017,34(10):2194-2204.
GUO Kaite, XIE Zonghong, LI Xiang, et al. An analytical model and its validation for a composite double lap joints under unidirectional tension[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2017, 34(10):2194-2204(in Chinese).

[9] SÜLÜ İ Y. Mechanical behavior of composite parts adhesively jointed with the insert double-lap joint under tensile load[J]. Welding in the world, 2018, 62(2):403-413.

[10] BARROSO A, MARÍN J C, MANTIČ V, et al. Premature failures in standard test specimens with composite materials induced by stress singularities in adhesive joints[J]. International journal of adhesion

and adhesives,2020,97:102478.

[11] YUAN W H, YANG T, YANG G X, et al. Enhancing mechanical properties of adhesive laminates joints using ultrasonic vibration-assisted preprocessing[J]. Composite structures,2019,227:111325.

[12] 刘斌,徐绯,司源,等.飞机用复合材料斜胶接修补结构的冲击损伤[J].复合材料学报,2018,35(10):2698-2705.
LIU Bin,XU Fei,SI Yuan,et al. Impact damage of composite scarf bonded repair structure for aircraft[J]. Acta materiae compositae Sinica,2018,35(10):2698-2705(in Chinese).

[13] KUPSKI J,TEIXEIRA DE FREITAS S,ZAROUCHAS D,et al. Composite layup effect on the failure mechanism of single lap bonded joints[J]. Composite structures,2019,217:14-26.

[14] AMIRI M,FARAHANI M. Adhesive composite joint reinforcement using button shape interlocking features[J]. International journal of adhesion and adhesives,2020,102:102651.

[15] UNGUREANU D,TĂRANU N,LUPĂSTEANU V,et al. Experimental and numerical investigation of adhesively bonded single lap and thick adherents joints between pultruded GFRP composite profiles[J]. Composites part B:Engineering,2018,146:49-59.

[16] 王成华,杨阳,康强,等.一种新型刚度退化模型及复合材料结构渐进损伤分析的通用方法实现[J].工程力学,2016,33(4):17-23.
WANG Chenghua,YANG Yang,KANG Qiang,et al. A stiffness degradation model and a general method for progressive failure analysis of composite structures[J]. Engineering mechanics,2016,33(4):17-23(in Chinese).

[17] 慕文龙,那景新,秦国锋,等.交变载荷对 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头剩余强度的影响[J].复合材料学报,2019,36(5):1124-1131.
MU Wenlong,NA Jingxin,QIN Guofeng,et al. Effect of alternating load on residual strength of adhesively bonded CFRP composite-aluminum alloy joints[J]. Acta materiae compositae Sinica,2019,36(5):1124-1131(in Chinese).

[18] 曹弘毅,姜明顺,马蒙源,等.复合材料层压板分层缺陷相控阵超声检测参数优化方法[J].材料工程,2020,48(9):158-165.
CAO Hongyi,JIANG Mingshun,MA Mengyuan,et al. Parameter optimization method for delamination defects detection of composite laminate using phased array ultrasonic[J]. Journal of materials engineering,2020,48(9):158-165(in Chinese).

[19] 寇海霞.复合材料风电叶片刚度退化模型研究[D].兰州:兰州理工大学,2019.

[20] 姜华强.复合材料层压板的损伤评估与修理研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.

（编辑　张璐）